

вимоги; ДСТУ 4046-2001. – [Чинний від 27.07.2001]. – К.:Держстандарт України, 2001. – 24 с. **5.** Расчет на прочность действующих магистральных трубопроводов с дефектами; ВБН В.2.3.-00018201.04-2000. – [Введен в действие с 2000-01-05]. – К.: Госнефтегазпром, 2000. – 56 с. **6.** *Красовский А.Я.* Применения критериальных диаграмм разрушения для оценки несущей способности конструктивных элементов с трещиной / *А.Я. Красовский* // Заводская лаборатория. – 1989. – № 4. – С. 89 – 92. **7.** *Морозов Е.М.* Двухкритериальные подходы в механике разрушения / *Е.М. Морозов* // Пробл. прочности. – 1985. – № 10. – С. 103 – 108. **8.** Сосуды. Аппараты. Трубопроводы. Нормы и методы расчета на прочность. Определение допускаемых параметров повреждения стенок сосудов и трубопроводов; СОУ “УкрНИИхиммаш” 001:2009. – [Чинний від 2009-02-02]. – Харьков: Стандарт предприятия, 2009. – 10 с. **9.** Посудини та апарати сталеві зварні. Загальні технічні умови; СОУ МПП 71.120-217:2009. – [Чинний від 2009-07-07]. – К.: Мінпромполітики України, 2009. – 339 с. **10.** Посудини та апарати, що працюють під тиском. Методика ультразвукового контролю зварних з’єднань; ГСТУ 3-037-2003. – [Чинний від 2004 -01-01]. – К.: Мінпромполітики України, 2003. – 104 с. **11.** Методика оценки работоспособности сосудов с вмятинами и овальностью. – ОАО «УКРНИИХИММАШ», 2005.

*Поступила в редколлегию 25.03.10*

УДК 620.16.001.24

**Б.Я. КАНТОР**, докт. техн. наук, ИПМаш НАН України, г. Харьков,  
**В.М. ДОЛИНСКИЙ**, канд. техн. наук,  
**Р.Л. ОНАЦКИЙ**, ОАО "УкрНИИхиммаш", г. Харьков, Украина

## **ВЛИЯНИЕ ВМЯТИН НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ СОСУДОВ**

В роботі порівнюється тримкість посудин без ум'ятин та при наявності вм'ятин на стінці корпусу посудини. На основі методу скінченних елементів проаналізовано напружено-деформований стан посудини на різних стадіях навантаження: утворення ум'ятини індентором, розвантаження, подальше навантаження внутрішнім тиском із частковою рихтовкою ум'ятини.

В работе сопоставлена несущая способность сосудов без вмятин и при наличии вмятин на стенке корпуса сосуда. На основе метода конечных элементов был проведен анализ напряженно-деформированного состояния сосуда на различных стадиях нагружения: формирования вмятины индентором, разгрузка, последующее нагружение внутренним давлением с частичной рихтовкой вмятины.

The carrier ability vessel was matched in work without dents and at presence of the dent. On base of the finite element method is analyzed stress-deformed condition of the vessel on different stages of the external load: forming the dent by means of stamp, unload and the following loading internal pressure with partial straightening of the dent.

Типовая конструкция сосуда представляет собой обечайку (тонкостенную, круговую цилиндрическую оболочку) с эллиптическими днищами. Сосуд устанавливается на опорах, горизонтальных или вертикальных.

На сосуде имеется несколько штуцеров, соединяющихся с трубопроводами (рисунок).

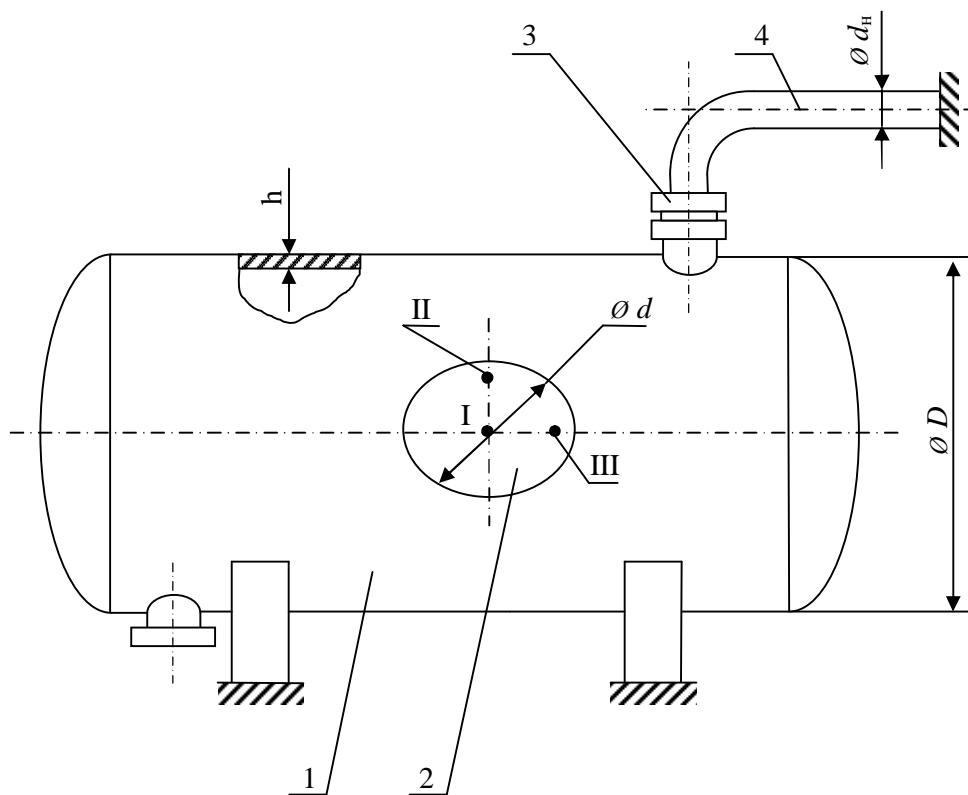


Рисунок – Схема установки:

1 – сосуд под давлением; 2 – вмятина; 3 – фланцевое соединение; 4 – трубопровод.

Если эллиптические днища – стандартные (высота составляет  $\frac{1}{4}$  диаметра сосуда), то они являются равнопрочными с обечайкой.

Основной нагрузкой действующей на сосуд является давление среды  $P$ .

В безмоментной зоне конструкции действуют главные напряжения: окружные  $s_j = Pg$ ,  $g = \frac{D}{2h}$  и осевые  $s_z = 0.5s_j$ .

Обычно  $3^{-\text{им}}$  напряжением  $s_r$  пренебрегают, поскольку  $P \ll s_j$ .

Так как  $g$  величина порядка  $100 \div 200$ .

Интенсивность напряжений  $s_i = \frac{\sqrt{3}}{2} s_j$ .

Условие прочности сосуда в безмоментной зоне выполняется если:

$$s_i \leq [s] = \frac{R_e}{[n_e]},$$

где  $[s]$  – допускаемые напряжения,  $R_e$  – предел текучести,  $[n_e]$  – допускаемый запас прочности по ГОСТу [1].

Тогда, допускаемое давление:  $[P] = [s] \frac{4h}{\sqrt{3}D}$ , а предельное  $P_e = R_e \frac{4h}{\sqrt{3}D}$ .

Если места действия локальных нагрузок (у штуцеров и опорных устройств) конструктивно укреплены, тогда несущая способность сосуда определяется предельным давлением  $P_e$ .

В процессе изготовления и монтажа сосуда возможны повреждения стенки в виде вмятин.

Очевидно, что в области вмятин напряженное состояние значительно отличается от состояния сосуда в неповрежденных местах.

Существует мнение, что вмятины снижают несущую способность сосуда.

Есть методика [2], которая позволяет получить величину снижения несущей способности.

В тоже время, в методике УкрНИИХиммаш была рассмотрена бесконечная обечайка с бесконечной вмятиной.

На основе нелинейной теории предельного равновесия показано, что несущая способность обечайки с вмятиной не снижается по сравнению неповрежденной конструкцией[3].

Целью настоящей работы является, определить напряженно-деформированное состояние и несущую способность типового сосуда с типичной вмятиной.

Анализ данных по обследованию оборудования УкрНИИХиммашем показал, что вмятины, хотя и отличаются от круглых в плане, вписываются в окружности, диаметры, которых находятся в пределах  $150 \div 500$  мм.

Глубина вмятины составляет  $a = (0.5 \div 2.5)h$ .

Рассмотрим два одинаковых сосуда, один из которых не имеет, а другой содержит вмятину. Схема сосуда приведена на рисунке.

### **Сосуд без вмятины.**

Размеры сосуда: диаметр сосуда  $D = 3м$ , длина гладкой обечайки  $l = 7.5м$ , толщина стенки  $h = 15мм$ , материал – сталь Ст3, модуль упругости  $E = 2 \cdot 10^5 МПа$ , коэффициент Пуассона  $\nu = 0.3$ , модуль упрочнения  $E_T = 2 \cdot 10^3 МПа$  (использовалась схематизация диаграммы растяжения диаграммой с линейным упрочнением), предел текучести  $R_e = 250 МПа$ , допускаемое напряжение  $[S] = 166.6 МПа$ .

Трубопровод изготовлен из стали Ст20,  $R_e = 220 МПа$ , допускаемое напряжение  $[S] = 146.6 МПа$ , длина трубопровода до жесткой опоры  $L = 1м$ , наружный диаметр  $d_H = 219мм$ , толщина стенки  $S = 10мм$ .

Допускаемое давление для сосуда:  $[P] = 1.92 МПа$ .

Предельное давление:  $P_e = 2.88 МПа$ .

Для оценки работоспособности конструкции рассмотрим три режима нагрузки давлением: допускаемым, предельным и перегрузочным. В последнем случае давление перегрузки  $P_{II} = 1.1P_e = 3.16 МПа$ .

Первый режим является стандартным расчетным режимом. Второй режим используется при диагностике сосудов[4]. Третий режим используют при технологической обработке[5,6]

При первых двух режимах нагружения напряжения в обечайке сосуда упругие. Причем, максимумы интенсивности напряжений равны, соответственно,  $[\sigma]$  и  $R_e$ .

Нетрудно убедиться в том, что напряжения в трубе, присоединенной к сосуду, также являются упругими.

В случае перегрузки напряжением в сосуде  $S_i = 1.1R_e$ .

Это вызовет значительные радиальные перемещения.

Для их определения воспользуемся условием несжимаемости:

$$e_j + e_z + e_r = 0$$

Осевые деформации:  $e_z = const = 0$ , следовательно  $e_j = -e_r$ .

Зависимость интенсивности деформаций от главных линейных:

$$e_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(e_j - e_r)^2 + (e_r - e_z)^2 + (e_z - e_j)^2} = \frac{2}{\sqrt{3}} e_j$$

Интенсивность деформаций:

$$e_i = \frac{R_e}{E} + \frac{s_i - R_e}{E_T} = R_e \left( \frac{1}{E} - \frac{0.1}{E_T} \right)$$

Таким образом, радиальные перемещения сосуда:

$$V = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{D}{2} \left( R_e \left( \frac{1}{E} - \frac{0.1}{E_T} \right) \right) = 17.86 \text{ мм}$$

Расчет показывает, что в этом случае в трубе возникнут пластические деформации  $e = 3.415\%$  и угол поворота фланца трубопровода составит  $q = 0.040(\text{рад})$ , который превышает допускаемое нормативное значение  $[q] = 0.013(\text{рад})$  [7].

В результате этого произойдет разуплотнение фланцевого соединения и, таким образом, технологическая схема окажется неработоспособной. Следовательно, технологическую обработку необходимо выполнять на специально приспособленных для этого установках.

### **Сосуд с вмятиной.**

Пользуясь методом конечных элементов, был произведен расчет той же цилиндрической оболочки, но с вмятиной глубиной  $a = 30 \text{ мм}$ , диаметром  $d = 450 \text{ мм}$ .

Рассматривались следующие этапы нагружения:

1 – образование вмятины под воздействием сферического индентора, диаметром 300 мм,

2 – разгрузка: сосуд с вмятиной индентор отсутствует,

3 и 4 – нагрузка и разгрузка под внутренним давлением  $[P] = 1.92 \text{ МПа}$ ,

5 и 6 – нагрузка и разгрузка предельным давлением  $P_e = 2.88 \text{ МПа}$ ,

7 и 8 – нагрузка, разгрузка перегрузочное давление  $P_{II} = 1.01 P_e = 2.9 \text{ МПа}$ ,

9 и 10 – нагрузка разгрузка  $P_{II} = 1.1 P_e = 3.16 \text{ МПа}$ .

Поставленная задача была решена с учетом геометрической и физической нелинейности.

Обечайка моделировалась объемными элементами с двадцатью узлами, имеющими три степени свободы в каждом узле.

Также была произведена серия уточняющих расчетов с различной густотой сетки, полученные результаты с достаточной точностью согласуются между собой, из чего следует, приемлемость выбора размеров конечного элемента.

Результаты расчетов для  $3^{-x}$  точек с максимальными напряжениями (I, II, III на рисунке) для вмятины представлены в таблице.

Как и следовало ожидать напряжения и деформации во вмятине значительно отличаются от напряжений в безмоментной зоне.

Имеются внутренние напряжения, которые суммируются с напряжениями от давления среды.

Таблица

Результаты расчета обечайки с вмятиной

Этапы нагружения		Номер точки	Положение точки	$\sigma_\varphi$ , МПа	$\sigma_z$ , МПа	$\sigma_i^{\max}$ , МПа	$\varepsilon_i^{\max}$ , %	$a$ , мм
1		2	3	4	5	6	7	8
Образование вмятины	Вдавливание индентора	I	нар. пов-ть	-128,9	-77,9	185,5	9,695	-57,0
			внутр. пов-ть	5,3	117,1			
		II	нар. пов-ть	-80,6	-281,4	260,0	0,690	-36,5
			внутр. пов-ть	117,5	290,2			
		III	нар. пов-ть	-269,1	-14,9	263,6	0,832	-33,6
			внутр. пов-ть	280,3	98,2			
	Разгрузка	I	нар. пов-ть	-192,2	-213,9	119,6	9,288	-30,5
			внутр. пов-ть	-137,6	-121,9			
		II	нар. пов-ть	275,5	223,0	257,1	0,668	-12,7
			внутр. пов-ть	-295,1	-106,8			
		III	нар. пов-ть	274,4	107,9	237,0	0,799	-10,8
			внутр. пов-ть	-12,8	-133,9			
Допускаемое давление	Нагружение $P = [P]$	I	нар. пов-ть	106,8	21,3	153,1	7,358	-12,9
			внутр. пов-ть	-130,6	-99,2			
		II	нар. пов-ть	184,6	286,4	247,8	0,596	-1,3
			внутр. пов-ть	-4,8	-146,4			
		III	нар. пов-ть	278,7	76,4	249,0	0,367	0,12
			внутр. пов-ть	110,4	-34,7			
	Разгрузка $P = 0$	I	нар. пов-ть	-358,4	-255,7	253,6	7,379	-17,8
			внутр. пов-ть	153,0	179,8			
		II	нар. пов-ть	-18,7	56,0	178,1	0,568	-4,7
			внутр. пов-ть	-151,6	-195,2			
		III	нар. пов-ть	-49,4	3,2	150,2	0,269	-3,2
			внутр. пов-ть	13,6	-144,6			

Продолжение таблицы

1		2	3	4	5	6	7	8
Предельное давление	Нагружение $P = P_e$	I	нар. пов-ть	181,9	81,1	208,5	6,201	-3,7
			внутр. пов-ть	-51,2	-109,6			
		II	нар. пов-ть	187,6	287,3	248,9	0,584	2,6
			внутр. пов-ть	267,9	60,3			
		III	нар. пов-ть	297,1	92,8	262,8	0,808	4,3
			внутр. пов-ть	295,2	138,6			
	Разгрузка $P = 0$	I	нар. пов-ть	-342,6	-263,9	250,5	6,183	-6,4
			внутр. пов-ть	-65,1	29,9			
		II	нар. пов-ть	-63,1	103,7	146,1	0,532	0,72
			внутр. пов-ть	-72,3	-64,6			
		III	нар. пов-ть	26,0	8,3	52,4	0,687	2,6
			внутр. пов-ть	16,5	-42,5			
Перегрузка	Нагружение $P = 1,01P_e$	I	нар. пов-ть	187,5	94,7	213,9	6,105	-2,3
			внутр. пов-ть	-19,9	-114,0			
		II	нар. пов-ть	217,6	279,4	250,6	0,585	3,6
			внутр. пов-ть	280,3	102,3			
		III	нар. пов-ть	297,7	88,1	264,3	0,807	5,3
			внутр. пов-ть	297,1	159,9			
	Разгрузка $P = 0$	I	нар. пов-ть	-322,4	-245	241,9	6,084	-4,8
			внутр. пов-ть	-72,1	-0,9			
		II	нар. пов-ть	-43,5	96,5	124,3	0,522	1,6
			внутр. пов-ть	-59,6	-25,8			
		III	нар. пов-ть	30,2	-3,0	32,0	0,764	3,5
			внутр. пов-ть	6,9	-23,2			
	Нагружение $P = 1,1P_e$	I	нар. пов-ть	252,6	168,8	266,2	5,581	19,5
			внутр. пов-ть	219,8	-41,9			
		II	нар. пов-ть	326,5	178,2	281,4	1,170	22,3
			внутр. пов-ть	322,3	158,2			
		III	нар. пов-ть	325,6	148,1	284,2	1,833	22,5
			внутр. пов-ть	326,1	174,1			
	Разгрузка $P = 0$	I	нар. пов-ть	-155,4	-88,7	133,4	5,530	17,6
			внутр. пов-ть	-32,5	-105,8			
		II	нар. пов-ть	5,8	3,3	14,9	1,574	20,2
			внутр. пов-ть	-12,1	4,1			
		III	нар. пов-ть	11,0	-8,3	16,8	1,70	20,6
			внутр. пов-ть	-2,5	5,9			

Суммарные напряжения значительно выше мембранных составляющих.

Мембранные напряжения во вмятине в рабочем режиме  $S = 191 \text{ МПа}$  незначительно отличаются от мембранных напряжений в безмоментной области  $S_j = 192 \text{ МПа}$ .

Внутреннее давление рихтует вмятину и понижает уровень внутренних напряжений.

Наиболее значительные результаты получены при повышенных значениях давления.

Поскольку в области вмятины имеются пластические деформации условие прочности проверяется, по соответствующему нормативному документу [8], регламентирующему допускаемый уровень пластических деформаций:

$$e_i < [e]$$

Условие прочности  $9.695\% < 53.23\%$  выполнено

### **Выводы.**

Таким образом, вмятина не снижает несущую способность сосуда.

Однако значительный уровень внутренних напряжений может понизить циклическую прочность конструкции.

Опасность снижения циклической прочности возникает при неблагоприятной форме штампа, который может значительно повысить внутренние напряжения и деформации.

Обработка сосуда с вмятиной повышенным давлением в соответствии с имеющимися нормативными документами [6, 8] рихтует вмятину и значительно (в 2 раза) снижает внутренние напряжения

Следует также иметь в виду, что высокий уровень напряжений может неблагоприятно сказаться на стойкости конструкции при коррозионном растрескивании под напряжением.

**Список литературы:** 1. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность; ГОСТ 14249-89. – [Дата введения 01.01.90]. – Издательство стандартов, 1989. – 79 с. 2. Методические указания по проведению поверочных расчетов котлов и их элементов на прочность. – АОЗТ "ДИЭКС", 1996. 3. Методика оценки работоспособности сосудов с вмятинами и овальностью. – ОАО "УКРНИИХИММАШ", 2005. 4. Проведение работ по оценке остаточной работоспособности технологического оборудования нефтеперерабатывающих, нефтехимических и химических производств. Методические указания; НПАОП 0.00-7.02-93. – [19.05.1993]. – К.: Госнадзор-охрантруда, 1993. – 56 с. 5. Посудини та апарати сталеві зварні. Загальні технічні умови; СОУ МПП 71.120-217:2009. – [Чинний від 2009-07-07]. – К.: Мінпромполітики України, 2009. – 339 с. 6. Сосуды. Аппараты. Трубопроводы. Гидрообработка; СОУ ОАО "УКРНИИХИММАШ" 004:2009. – [Дата введения 10.08.2009]. – Харьков.: Стандарт предприятия, 2009. – 12 с. 7. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность герметичность фланцевых соединений: РД 26-15-88. – [Дата введения 01.07.89]. – М.: НИИхиммаш, 1990. – 63 с. 8. Посудини та апарати. Вибір зміцнювального оброблення; ДСТУ 4003-2000. – [Чинний від 29.12.2000]. – К.: Держстандарт України, 2001. – 15 с.